

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-18

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

CRUCETA GUÍA SUPERIOR DE GENERADORES HIDROELÉCTRICOS DE GRAN TAMAÑO: ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA INCREMENTAR LA RIGIDEZ Y REDUCIR LAS FUERZAS DE ORIGEN TÉRMICO

C.J. LEIVA*
IMPSA
Argentina

J. GERMANO
IMPSA
Argentina

Resumen – *En generadores hidroeléctricos de gran tamaño, las crucetas guía son estructuras que en general, deben cumplir una doble función: brindar soporte al cojinete guía y transferir las fuerzas originadas en la línea de ejes, desde el cojinete a los apoyos en la estructura civil. Al mismo tiempo, durante la operación del generador, el aire recirculante para la refrigeración de los componentes activos del rotor y del estator, transfiere calor a la cruceta produciendo una dilatación que debe ser controlada para garantizar el buen funcionamiento del cojinete y reducir los esfuerzos que esto conlleva, tanto para la cruceta como para la estructura civil. En este trabajo se plantea la problemática y se estudian alternativas para mejorar dos de las acciones principales asociadas a las funciones de la cruceta: Incrementar la rigidez del apoyo de los cojinetes y disminuir los esfuerzos de origen térmico transferidos a la obra civil*.

Palabras clave: Generadores y Turbinas hidroeléctricas – Cruceta guía – Cojinete guía –Fundación – Apoyo elástico – Resortes de discos– Soporte visco-elástico.

1 INTRODUCCIÓN

La cruceta guía superior tiene por objetivo principal, brindar un soporte radial a la línea de ejes transfiriendo las fuerzas que provienen principalmente del rotor del generador a la estructura civil. Una parte de estas fuerzas es de carácter dinámico, originada por los desbalanceos mecánicos y magnéticos, que presentan un máximo y un mínimo por cada vuelta de la máquina en cada apoyo, y por cuanto pueden ser idealizadas como fuerzas que varían en forma harmónica. Y otra parte es de carácter estático, como los esfuerzos de origen térmico, originados por las restricciones a las dilataciones libres que imponen los apoyos, y las precompresiones, en caso de utilizar apoyos que transfieran fuerzas de compresión a la estructura civil. En concordancia con el objetivo principal, el soporte del cojinete (entendiendo por tal a la cadena en serie de las estructuras desde el cojinete hasta el apoyo en la obra civil) debe ser lo suficientemente rígido para garantizar que la velocidad crítica permanezca alejada de la velocidad de rotación, y de esta manera disminuir las amplificaciones dinámicas de estas fuerzas. Con respecto a las fuerzas estáticas, es el diseño de la cruceta, en primera instancia, (que además debe ser compatibilizado con requerimientos constructivos, económicos y de transporte), el que puede manejarse para eliminar las fuerzas de origen térmico, que aparecen principalmente por el incremento de temperatura en el aire circundante y en menor medida por el calentamiento del aceite en el cojinete, o en su defecto, para disminuirlas tanto como sea posible. En una segunda instancia es el diseño del apoyo en la obra civil, el que puede brindar ayuda al respecto. Además de los requerimientos citados para la cruceta, se deben atender los requerimientos del cojinete, que debe mantener un huelgo mínimo para asegurar su buen funcionamiento.

* Carril Rodriguez Peña 2451, M5503AHY, Godoy Cruz - Mendoza - Argentina – carlos.leiva@impsa.com

2 DISEÑO DE LA CRUCETA

2.1 Funciones de la Cruceta

2.1.1 Soportar al cojinete guía

El cojinete debe mantener un huelgo mínimo de trabajo para asegurar un buen funcionamiento y así evitar un desgaste prematuro. Cuando la cruceta tiene restricciones que impiden la dilatación libre, es necesario estudiar los desplazamientos que esta esta situación genera para evitar que el huelgo desaparezca.

2.1.2 Aportar la rigidez necesaria a la línea de ejes para asegurar su estabilidad

La línea de ejes debe permanecer centrada, para disminuir las fuerzas por desbalanceo, y debe mantener alejada la velocidad crítica de las velocidades de rotación. En generadores de gran tamaño lo usual es apoyar la cruceta en la estructura civil para cumplir con este objetivo.

2.1.3 Transferir las fuerzas desde el cojinete a la estructura civil

Todas las fuerzas que provienen de la línea de ejes deben ser transmitidas desde el cojinete hasta los soportes de la cruceta. En generadores de gran tamaño la magnitud de estas fuerzas, por lo general, requiere la utilización de soportes en la obra civil.

2.1.4 Soportar la cubierta superior del generador.

Por sus dimensiones y disposición, la cruceta superior es generalmente la estructura soporte de la cubierta superior y suele apoyarse en la carcasa del estator.

2.2 Cruceta de Brazos Radiales

En estas crucetas, las fuerzas en el cojinete son transferidas a la obra civil por medio de brazos que trabajan generalmente en compresión, lo cual es motivado principalmente porque el hormigón es un material que resiste mucho mejor este tipo de fuerzas que cualquier otro. Cuando los generadores son de gran tamaño, se requiere interponer apoyos flexibles entre los extremos de los brazos y las placas de fundación para disminuir los esfuerzos de origen térmico, y las fuerzas en la fundación que estos producen. Por otro lado se debe garantizar un huelgo mínimo de trabajo en el cojinete evitando que este desaparezca por la dilatación de los brazos. Otro requerimiento es la precompresión de los apoyos, debido a la imposibilidad de tomar fuerzas de tracción en los mismos, que debe ser al menos igual a la máxima fuerza de tracción que pueda experimentar el brazo.

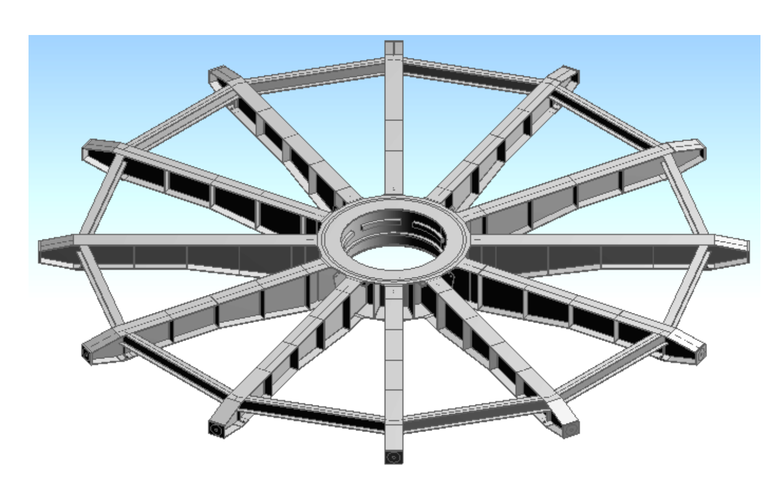
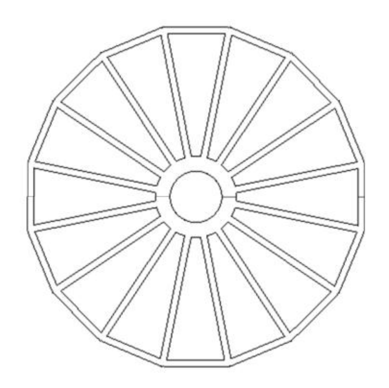


Fig. 1– Cruceta de brazos radiales

2.3 Otros diseños

Es posible diseñar la cruceta para que dilate libremente y transfiera a la obra civil las fuerzas provenientes del cojinete, mediante apoyos capaces de tomar fuerzas en dirección tangencial al recinto del generador. De esta manera se eliminan los esfuerzos térmicos sin comprometer la estabilidad de la línea de ejes. En este

sentido pueden plantearse diseños con la incorporación de brazos tangenciales como el de la Fig. 2(a), o un entramado de elementos estructurales que conformen un reticulado plano mediante la triangulación de los mismos como el de la Fig. 2(b). Otra posibilidad es la utilización de brazos oblicuos [1] [2] que liberan la mayor parte de los esfuerzos térmicos mediante la flexión de sus brazos como el de la Fig. 2(c).
Estos diseños suponen un desafío mayor en su construcción. En generadores de gran tamaño, generalmente es muy difícil construir las crucetas en una sola pieza por problemas asociados al transporte. Por lo que una parte importante del trabajo constructivo debe realizarse en sitio.



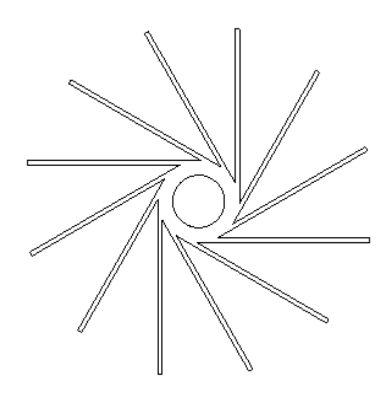


Fig. 2–(a) Brazos tangenciales Fig. 2–(b) Reticulada Fig. 2–(c) Brazos oblicuos

3 DISEÑO DE LOS APOYOS

3.1 Soportes Elásticos

El apoyo elástico permite disminuir los esfuerzos de origen térmico mediante su flexibilidad. De manera de disminuir la restricción a la dilatación. Pero su flexibilidad va en detrimento de la rigidez del apoyo del eje en el cojinete, por lo cual es necesario llegar a una solución de compromiso en la que se disminuya el esfuerzo tanto como sea posible sin poner en riesgo la estabilidad de la línea de ejes. El soporte por lo general se materializa mediante pilas de resortes de disco [3] y algún dispositivo que permita precomprimir el apoyo para tomar fuerzas de tracción en el brazo, sin dejar de transferir fuerzas de compresión a la fundación. La Fig. 3 muestra el diseño de un apoyo elástico provisto de resortes de disco y un tornillo con tuercas para realizar la precompresión.

3.2 Soportes Visco-Elásticos

Los soportes visco-elásticos [4] permiten disminuir las fuerzas de origen térmico en mayor medida que los elásticos, debido a que ofrecen una alta flexibilidad a fuerzas cuasi-estáticas. Además de esta característica poseen amortiguamiento, lo que permite disminuir la amplitud de desplazamientos en el apoyo de la estructura de manera considerable, respecto de los soportes elásticos. Si bien sus características de amortiguamiento son las que permiten disminuir los desplazamientos, a los efectos de comparar cuantitativamente con los apoyos elásticos, estos equivalen a soportes elásticos con mayor rigidez para las fuerzas que provienen del cojinete.

3.3 Leyes de Comportamiento

Soporte Elástico: $F = F_0 + K \cdot u$ Ec. 1

Soporte Visco-Elástico: $F = F_0 + Au + Bu^2 + Cv^{\alpha}$ Ec. 2

Donde u es el desplazamiento, v es la velocidad, F_0 es la precompresión, K es la rigidez, A y B son constantes de rigidez, C es la constante de amortiguamiento y α es el exponente en la velocidad por amortiguamiento no lineal.

4 SOLUCIONES PARA UN GENERADOR DE GRAN TAMAÑO

El caso de estudio corresponde a un generador cuyas características principales son: potencia = 680 MVA, velocidad nominal = 90 rpm, velocidad de embalamiento = 169 rpm, masa del rotor = 1260 tn, diámetro del recinto del generador = 24.6 m, Incremento térmico = 15°C.
El tipo de cruceta elegido es de brazos radiales, con apoyos axiales en la carcasa del estator, y apoyos radiales en la obra civil. Su elección responde a la facilidad constructiva, de montaje y de transporte de las partes componentes.
A continuación se analizan dos alternativas que cumplen con las premisas de diseño: disminución de fuerzas de origen térmico, rigidez necesaria en el apoyo del eje y huelgo suficiente en el cojinete para no afectar su funcionamiento. En ambos casos se presentan los resultados obtenidos para las condiciones de operación nominal, y las condiciones accidentales de embalamiento y de corto circuito en la mitad de los polos del rotor.

4.1 Solución con Soporte Elástico

Se diseñó un dispositivo compuesto por 5 resortes de disco apilados en paralelo (Fig. 3). Se escogieron resortes de gran diámetro para disminuir los efectos no lineales provocados por la fricción entre ellos, lo cual también es ayudado mediante lubricación de la pila con grasa a base de bisulfuro de molibdeno. Se asume que el apilado de resortes se comporta como un resorte lineal.
Este apoyo responde de igual manera ante las fuerzas que provienen del cojinete y las fuerzas que tienen origen en la restricción de la dilatación térmica de la cruceta. La única variable de ajuste es la rigidez del apilado de resortes, que puede modificarse cambiando: el tamaño de los resortes, su cantidad y/o la disposición de los resortes de disco en el apilado (arreglos en paralelo, serie, o combinaciones de ambos). El sistema se completa con elementos de contención y guiado de los resortes, placas de fijación a la placa de fundación y al extremo del brazo de la cruceta, y un perno con tuercas para aplicar y ajustar la pretensión.
La rigidez del soporte es de 300 kN/mm y la precompresión de 200 kN.

4.2 Solución con Soporte Visco-Elástico

Estos soportes son comerciales y fueron solicitados conforme a los requerimientos del proyecto (Fig. 4), es decir, fuerzas y desplazamientos máximos para las condiciones de operación de diseño normales y accidentales. Para el nivel de fuerzas de este proyecto se necesita un soporte VES250XD, cuyas características principales son: Precarga = 250 kN, Rigidez estática = 36.4 kN/mm, Rigidez estática (con incremento térmico) = 51.6 kN/mm, Constante de amortiguamiento = 180 kN/(mm/s)$^{0.3}$, Desplazamiento Máximo = 8mm, de los cuales 2 mm corresponden a la precompresión.
Este soporte actúa como un resorte cuasi-lineal con la rigidez estática ante la fuerza de pretensión, y con la rigidez estática con incremento térmico ante la fuerza térmica. La respuesta a la fuerza dinámica que proviene del cojinete es la de un amortiguador no lineal (exponente α en Ec. 2). En la Fig.6 puede observarse dicha respuesta en la que se aprecia una importante disminución en la amplitud de desplazamientos. En este caso puede considerarse una respuesta estática equivalente con una rigidez de 2200 kN/mm.

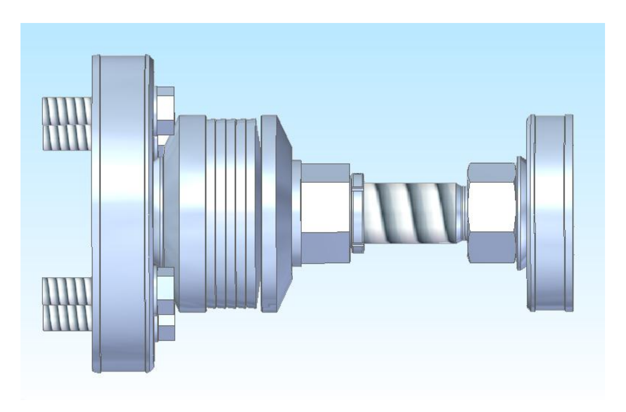


Fig. 3–Soporte Elástico

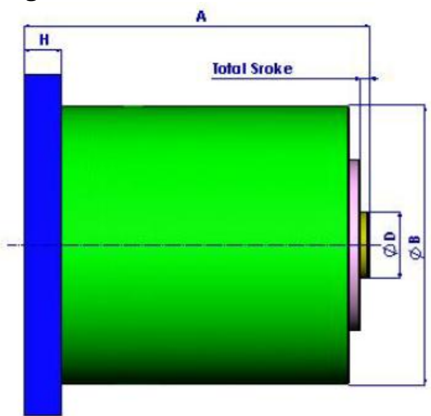


Fig. 4–Soporte Visco-Elástico

La fuerza térmica y las fuerzas dinámicas en los soportes fueron obtenidas con un modelo de elementos finitos de la cruceta (Ver Fig. 1).

TABLA I. FUERZAS ESTÁTICAS

Fuerzas Estáticas	Soporte Elástico	Soporte Visco-Elástico
Precompresión [kN]	200	250
Fuerza Térmica [kN]	585	134

TABLA II. FUERZAS DINÁMICAS

Condición de operación	Fuerza dinámica máxima [kN]
Nominal	161
Embalamiento	182
Corto circuito mitad de los polos	480

TABLA III. RESUMEN DE RESULTADOS

Condición de Operación	Soporte Elástico		Soporte Visco-Elástico	
	Fuerza Máxima en el soporte [kN]	Amplitud de Desplazamientos [mm]	Fuerza Máxima en el soporte [kN]	Amplitud de Desplazamientos [mm]
Nominal	946	1.08	545	0.05
Embalamiento	967	1.22	566	0.09
Corto circuito mitad de los polos	1265	3.20	864	3.39

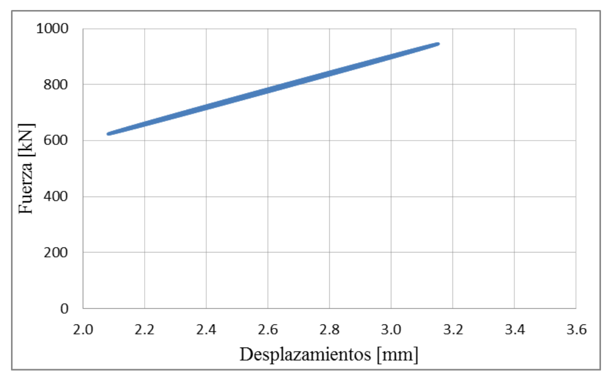


Fig. 5– Soporte Elástico en Operación Nominal

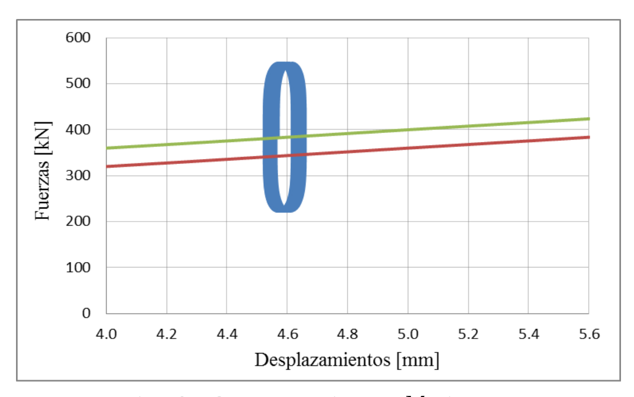


Fig. 6– Soporte Visco-Elástico en Operación Nominal

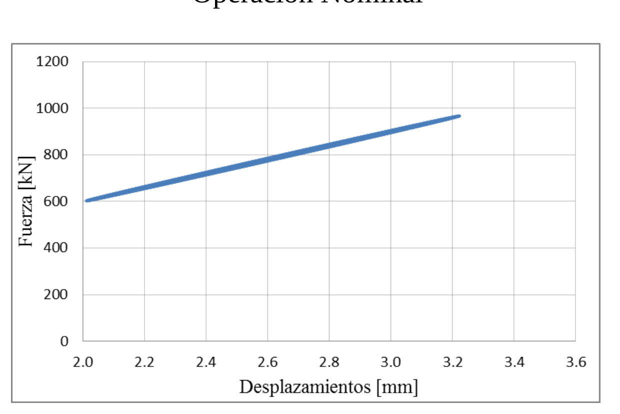


Fig. 7– Soporte Elástico en Embalamiento

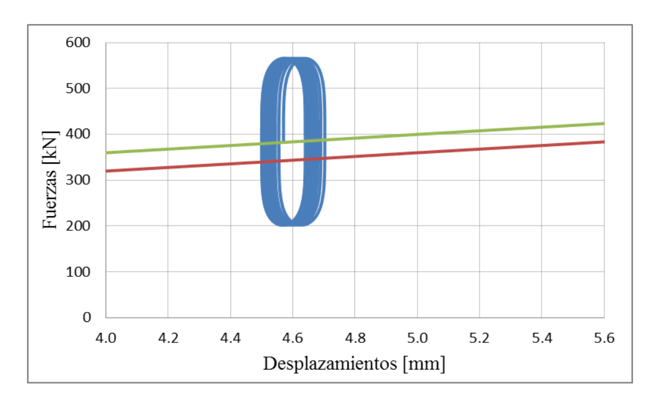


Fig. 8– Soporte Visco-Elástico en Embalamiento

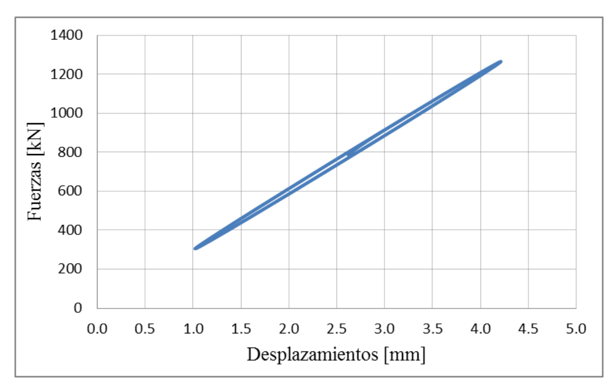


Fig. 9– Soporte Elástico en
Corto-Circuito de la mitad de los polos

Ref: Curva Fuerza-desplazamiento

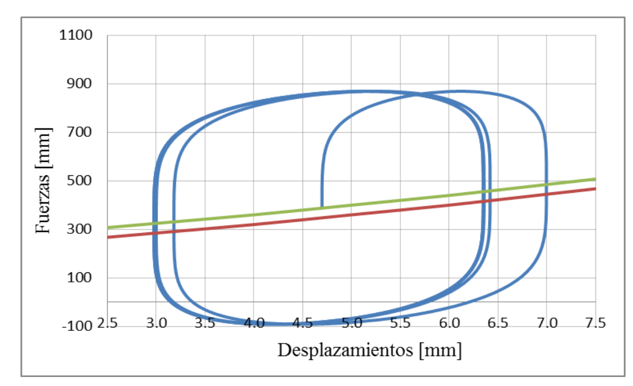


Fig. 10– Soporte Visco-Elástico en
Corto-Circuito de la mitad de los polos

Ref: Curva Fuerza-desplazamiento
Respuesta estática 25°C
Respuesta estática 40°C

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado la problemática de la transferencia de las fuerzas que actúan en la cruceta guía a la fundación en la estructura civil, que debe conciliarse con la consecución de la rigidez necesaria en el apoyo del eje. Se presentó un caso de estudio de un generador de gran tamaño con el cual se pudo apreciar que la elección del sistema de apoyo entre cruceta y fundación influye en:

- La rigidez del apoyo del eje y la fuerza por dilatación térmica: En el apoyo elástico, mayor rigidez se traduce en mayor rigidez del apoyo del eje y a su vez en mayor fuerza en las fundaciones por la imposibilidad de separar los esfuerzos térmicos de los provenientes del cojinete. En el apoyo visco-elástico, los esfuerzos térmicos pueden reducirse de manera considerable, y mejorarse la rigidez al incorporar amortiguamiento.
- Los desplazamientos en los extremos de los brazos de la cruceta según la condición de operación: Cuando la fuerza corresponde a una condición de operación normal, o lejana a la fuerza máxima que puede transferir el apoyo visco-elástico, los desplazamientos son pequeños y por tanto la rigidez del apoyo del eje mayor. En el caso del apoyo elástico la proporcionalidad es lineal y mayor fuerza importa mayor desplazamiento. Cuando la fuerza es cercana a la máxima que puede experimentar el apoyo visco-elástico, ambos apoyos presentan amplitudes de desplazamiento similares.

6 REFERENCIAS

[1] L. Gongzhi, L. Zhihe, A Fuerst and D. Schafer, “Application of oblique elements to Three Gorges Projet”, *IEEE, ICEMS*, pp. 116-122 vol. 1, 2001.

[2] H. Sprysl, H. Vögele, and G. Ebi, “The Influence of Magnetic Forces on the Stability Behavior of Large Electrical Machines”, *VDI Berichte Nr 1285*, 1996.

[3] W. Young, R. Budynas, *Roark’s for Stress and Strain*. McGraw-Hill, 2002.

[4] S. Ruan, “Reducing the Effects of Vibration and Thermal Expansion Forces on Vertical Shafts Generators”, in *HydroVision*, Brasil, Sept. 2012.